

멀티코드 CDMA 시스템에서 비선형 왜곡에 대처하는 PAPR 저감 기법

PAPR Reduction Method for the Nonlinear Distortion in the Multicode CDMA System

김상우 · 김남일 · 김선애 · 서재원 · 유흥균

Sang-Woo Kim · Namil Kim · Sun-Ae Kim · Jae-Won Suh · Heung-Gyoon Ryu

요 약

Multi-code code division multiple access(MC-CDMA) 시스템은 다수의 코드 사용으로 인한 용량의 증가를 통해 다양한 속도, 다양한 품질의 서비스를 제공할 수 있다는 장점을 갖는다. 그러나, 여러 개의 코드들이 합쳐지면서 PAPR(Peak to Average Power Ratio)이 크게 증가되므로 비선형 왜곡에 의한 시스템 성능이 크게 저하되고, 이를 위해 HPA(High Power Amplifier)에서 많은 양의 back-off를 해야 하므로 큰 전력 손실이 나타난다. 본 논문에서는 들어오는 정보 데이터에 상응하는, 즉 입력 데이터의 상관 관계에 의한 constraint code의 삽입함으로써 PAPR을 효율적으로 낮출 수 있는 방법을 제안한다. PAPR 저감 효과는 사용된 constraint code의 길이와 index에 의존하며, PAPR 저감 효과와 constraint code의 길이 사이에 trade-off가 존재한다. HPA 및 AWGN 채널을 고려한 시뮬레이션 결과에서, 1) Input back-off 없이 가능한 모든 constraint code를 사용해 신호를 선택한 경우와 2) 약간의 input back-off와 몇 가지 constraint code만을 이용해 신호를 선택한 경우에서, BER 성능이 선형 HPA를 사용한 OFDM의 성능과 거의 같게 나타남을 확인할 수 있다.

Abstract

Multi-code code division multiple access(MC-CDMA) has been proposed for providing the various service rates with different quality of service requirement by assigning multiple codes and increasing the capacity. However, it suffers from the serious problem of high peak to average power ratio(PAPR). So, it requires large input back-off, which causes poor power consumption in high power amplifier(HPA). In this paper, we propose a new method that can reduce PAPR efficiently by constraint codes based on the opposite correlation to the incoming information data in MC-CDMA. PAPR reduction depends on the length and indices of constraint codes in MC-CDMA system. There is a trade-off between PAPR reduction and the length of constraint codes. From the simulation results, we also investigate the BER improvement in AWGN channel with HPA. The simulation results show that BER performance can be similar with linear amplifier in two cases: 1) Using exact constraint codes without input back-off and 2) a few constraint codes with small input back-off.

Key words : Multicode CDMA, PAPR, HPA, Correlation

I. 서 론

최근 들어 멀티 미디어 및 인터넷 서비스를 위한
고속의 무선 통신 시스템에 대한 연구가 활발히 이

충북대학교 전자공학과 및 컴퓨터정보통신연구소(Dept. of Electronic Engineering and Research Institute of Computer, Information & Communication, Chungbuk National University)

· 논문 번호 : 20050810-087

· 수정완료일자 : 2005년 11월 30일

루어지고 있다. 각 사용자들의 요구에 따라 맞춰 차별화된 양질의 서비스를 공급하기 위해서는 효과적인 multirate 전송 기술이 필요하다. 이러한 multirate 전송 기술로써는 CDMA에 기초한 두 가지 시스템을 예로 들 수 있다. 하나는 멀티코드 CDMA(MC-CDMA)이고, 다른 하나는 가변적인 spreading gain을 이용한 CDMA(VSG-CDMA)이다. 유연한 데이터 전송 속도들을 요구하는 네트워크 환경에서, MC-CDMA는 spreading gain을 나눔으로써 data rate만을 조절하는 VSG-CDMA보다 더 유리하다. 즉, MC-CDMA는 사용자의 코드가 독립적으로 조절될 수 있기 때문에 adaptive resource allocation 기술에 더 유용하다^[1]. MC-CDMA는 사용자가 multiple orthogonal Walsh code를 할당함으로써 가변적인 통신 속도를 가질 수 있다. 즉, 사용된 Walsh-Hadamard Transform (WHT)은 입력 data를 확산하고 이를 조절함으로써 rate adaptation을 가능케 한다. 그러나, MC-CDMA는 WHT의 출력이 이진 신호가 아닌 multi-level 신호로써 높은 PAPR을 나타내는 하나의 커다란 단점을 갖는다. 이러한 높은 PAPR은 OFDM에서와 같이 시스템 성능을 확보하기 위해 high power amplifier(HPA)에서 큰 back-off를 필요로 하기 때문에 큰 전력 손실을 유발한다.

MC-CDMA에서의 PAPR 문제 역시 OFDM에서 거론된 여러 PAPR 저감 기법들을 적용함으로써 줄일 수 있다. 그 한 가지 예로써 신호 envelope 변화를 줄이는 precoding 기법이 연구되었다^{[3],[4]}. 여기서 사용되는 code는 참고문헌 [6]~[8]에서 체계적으로 연구되었으며, PAPR 감소와 함께 MC-CDMA에서 코드의 오류를 찾아내고 수정할 수 있게 한다. 참고문헌 [9]에서는 MC-CDMA의 통계적 특성을 분석하고 다중 신호 표현 기법의 두 가지 형태를 제안하였는데, 그것은 MC-CDMA에서 PAPR을 줄이는 SLM과 PTS이다. OFDM에서와 같이 PTS와 SLM은 효율적으로 PAPR을 줄일 수 있지만, phase rotation에 대한 부가 정보를 전송해야 함으로써 추가적인 에러율의 증가를 가져올 수 있다. 참고문헌 [10]과 [11]에서는 multicode system에서 비선형 HPA의 비선형 왜곡 특성에 따른 영향에 대해 연구되었다. 또한, 전치 왜곡기와 같이 비선형에 대항하는 기술과 병렬 전송 sequence를 감소시키는 몇몇 기술들이 제안되었다.

본 논문에서 입력 정보 data와 상반되는 correlation을 기초로 하는 constraint code를 사용함으로써 PAPR을 줄이는 방법을 제안한다. 이 기술은 참고문헌 [12]에서 보듯이 tone reservation이라는 이름으로 OFDM 신호의 PAPR을 줄이는 데 적용되었다. 제안한 방법은 MC-CDMA에서 효율적으로 PAPR을 줄일 수 있고 부가 정보가 필요하지 않다. 이 방법은 PAPR 저감과 constraint code의 길이 사이에 trade-off가 발생한다. 본 논문에서는 AWGN 채널에서 HPA가 포함되어 있을 때 제안된 방법의 BER 성능을 분석하며, 이를 시뮬레이션 결과로 나타낸다.

II. MC-CDMA 시스템

MC-CDMA에서 송신기의 간단한 block diagram은 그림 1과 같다.

사용자의 고속 stream data는 serial-to-parallel 변환기(S/P)에서 N 개의 병렬 stream들로 나뉜다. 각각의 stream은 자기 다른 Walsh code로 encoding되며, 이러한 encoding 동작은 Walsh-Hadamard Transform (WHT)과 동일하게 이루어진다. WHT의 출력은 다음과 같이 표현된다.

$$s = H_N(S_0, S_1, \dots, S_{N-1})^T \quad (1)$$

여기서 $S_k \in \{+1, -1\}$ 은 data symbol이다. $N \times N$ Hadamard 행렬 H_N 은 ± 1 로 이루어지며, $H_1 = (1)$ 을 기본으로 다음과 같이 정의될 수 있다.

$$H_N = \begin{pmatrix} H_{N/2} & H_{N/2} \\ H_{N/2} & -H_{N/2} \end{pmatrix}$$

Parallel-to-serial 변환기의 출력은 $s = (s_0, s_1, \dots, s_{N-1})$ 이다. 이 sequence $\{s_k\}$ 은 $-N$ 부터 N 까지 단계의 변화를 갖는 multi-level sequence이다. Multicode 전환 후, 최종 전송 신호는 사용자 구분을 위한 PN code

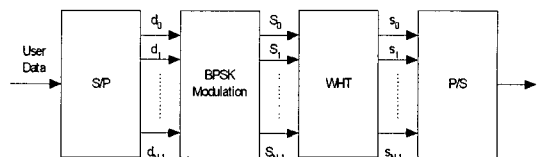


그림 1. MC-CDMA 송신기의 block diagram
Fig. 1. Block diagram of the MC-CDMA transmitter.

확산 및 filtering, 그리고 주파수 up conversion을 통해 얻어진다. 이러한 과정들은 PAPR에 큰 영향을 미치지 않기 때문에 본 논문에서는 고려하지 않기로 한다.

MC-CDMA의 peak to average power ratio(PAPR)은 다음과 같이 정의된다.

$$PAPR(s) = \frac{1}{N} \max_{0 \leq k \leq N-1} |s_k|^2 \quad (2)$$

참고문헌 [9]에 따르면 다음과 같이 구할 수 있다.

$$1 < PAPR(s) \leq N \quad (3)$$

즉, N 이 클 때, PAPR은 매우 높아진다. 예를 들면, $N=256$ 이면, 최대 PAPR은 24 dB($10\log_{10}(256)$)만큼 높아질 수 있다. 이렇게 높은 PAPR을 갖는 MC-CDMA 신호는 HPA(High Power Amplifier)와 같이 비선형 특성을 갖는 요소들을 거칠 때 크게 왜곡될 수 있다. 또한 앞서 언급한 바와 같이 N 이 증가할 때, 비선형 왜곡은 더욱 크게 발생한다. PAPR의 통계적 특성은 주로 complementary cumulative distribution function(CCDFF)을 사용하여 나타낸다.

$$CCDF(PAPR_0) = Pr(PAPR(s) > PAPR_0) \quad (4)$$

이러한 분포는 참고문헌 [9]에서 다음과 같이 산출되었다.

$$CCDF(c) = Pr(PAPR(s) > c) = 1 - [F(c)]^N \quad (5)$$

여기서

$$F(c) = \begin{cases} \sum_{l=0}^m Pr(|S_k| = 2l) & 2m \leq c < 2m+2 \\ 1 & N < c \end{cases} \quad (6)$$

이고

$$Pr(|S_k| = 2l) = \begin{cases} \frac{1}{2^N} \binom{N}{N/2} & l=0 \\ \frac{1}{2^{N-1}} \binom{N}{\frac{N+2l}{2}} & 0 < l \leq N/2 \end{cases} \quad (7)$$

이다.

위의 CCDF는 PAPR 성능 평가를 위해 매우 유용하게 사용될 수 있다.

그림 2는 WHT의 크기가 $N=64$ 인 MC-CDMA 신

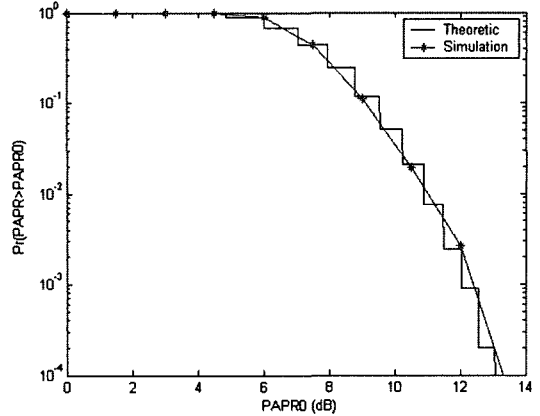


그림 2. $N=64$ 일 때 MC-CDMA 신호의 CCDF
Fig. 2. CCDF of MC-CDMA signal with $N=64$.

호의 CCDF를 보여준다. 임계값 12 dB를 초과하는 PAPR이 약 2.5×10^{-3} 이라는 것을 확률적으로 알 수 있다. 이것은 2.5×10^3 개의 MC-CDMA의 sample 중 한 개는 평균 값보다 12 dB 더 큰 peak 값을 가진다는 것을 의미한다. 앞서 기술한 바와 같이 MC-CDMA 신호의 PAPR은 매우 높아서 HPA를 거치면서 큰 비선형 왜곡을 겪으므로, 이러한 PAPR을 낮추는 방법에 관한 연구는 매우 중요하다.

III. 제안된 PAPR 저감 기법

본 논문에서 제한된 PAPR 저감 방법을 이용한 MC-CDMA의 block diagram이 그림 3과 같다. 그림 1에서 보여지는 일반적인 MC-CDMA system과 제안한 system의 다른 점은 입력되는 정보 data로부터 vector C 를 계산하는 것이다. 계산된 vector C 는 출력 신호의 peak 값을 줄이기 위해 사용된다.

그림 1에서 WHT의 출력 $s = (s_0, s_1, \dots, s_{N-1})^T$ 은

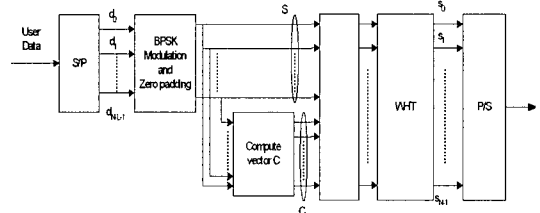


그림 3. 제안된 MC-CDMA system
Fig. 3. MC-CDMA system using proposed PAPR reduction.

multilevel 신호이며, 이는 vector와 행렬을 이용하여 다음과 같이 표현된다.

$$s = H \cdot S \tag{8}$$

여기서 $S=(S_0, S_1, \dots, S_{N-1})^T$ 이고 H 은 $N \times N$ Hadamard 행렬이다.

$$H = \begin{bmatrix} h_{11} & h_{12} & \dots & h_{1N} \\ h_{21} & h_{22} & \dots & h_{2N} \\ & & \dots & \\ h_{N1} & h_{N2} & \dots & h_{NN} \end{bmatrix} \tag{9}$$

그림 3에서 전체 PAPR을 낮추기 위한 vector $c = (c_0, c_1, \dots, c_{N-1})^T$ 을 구했을 때, 출력되는 vector $v = s + c$ 은 기존의 MC-CDMA 신호가 갖는 $PAPR(s)$ 보다 훨씬 낮은 $PAPR(v)$ 를 갖는다.

$$v = s + c = HV = H \cdot (S + C) \tag{10}$$

여기서 $C=(C_0, C_1, \dots, C_{N-1})^T$ 이다. 사용자 data를 encoding 하기 위해 N 개의 모든 Walsh code를 사용하지는 않는다고 볼 때, 사용되지 않는 code의 순차적인 부분집합을 $I=(i_0, i_1, \dots, i_{L-1})$ 이라 하자.

Index들은 $0 \leq i_0 \leq \dots \leq i_{L-1} < N$ 을 만족하고, 여기서 $L < N$ 은 사용되지 않는 code들의 수이다. 이때, vector C 는 다음을 만족시킨다.

$$V_k = S_k + C_k = \begin{cases} C_k & \text{if } k \in I \\ S_k & \text{if } k \notin I \end{cases} \tag{11}$$

여기서

$$C_k = \begin{cases} \neq 0 & \text{if } k \in I \\ = 0 & \text{if } k \notin I \end{cases} \text{ 이고 } S_k = \begin{cases} = 0 & \text{if } k \in I \\ \neq 0 & \text{if } k \notin I \end{cases} \tag{12}$$

이다.

그림 3에서, data vector S 는 단지 $N-L$ 개의 영이 아닌 원소들 $\hat{S} = S_k (k \notin I)$ 을 갖고 vector C 는 L 개의 영이 아닌 원소들 $\hat{C} = C_k (k \in I)$ 을 갖는다. 길이가 L 인 열 vector는 constraint code라 불리는 $k \in I$ $\hat{C} = (C_{i_0}, C_{i_1}, \dots, C_{i_{L-1}})^T$ 인 index 값으로 선택되고, \hat{H} 은 $k \in I$ 인 index으로 구성된 H 의 부분 행렬이다.

$$\hat{H} = \begin{bmatrix} h_{1i_0} & h_{1i_1} & \dots & h_{1i_{L-1}} \\ h_{2i_0} & h_{2i_1} & \dots & h_{2i_{L-1}} \\ & & \dots & \\ h_{Ni_0} & h_{Ni_1} & \dots & h_{Ni_{L-1}} \end{bmatrix} \tag{13}$$

$$c = H \cdot C = \hat{H} \cdot \hat{C} \tag{14}$$

PAPR을 저감하기 전의 MC-CDMA symbol의 PAPR은 다음과 같다.

$$PAPR(x) = \frac{1}{N} \max_{0 \leq k \leq N-1} |s_k|^2$$

그리고 제안된 방법에 의한 새로운 MC-CDMA symbol $s + c$ 의 PAPR은 다음과 같다.

$$PAPR(s + c) = \frac{1}{N} \max_{0 \leq k \leq N-1} |s_k + c_k|^2 \tag{15}$$

결합된 신호의 PAPR을 최소화하는 문제는 최대 peak 값을 최소화 시키는 c^{opt} 또는 C^{opt} 의 값을 찾는 것과 같다.

$$\min_c |s + c|_\infty = \min_{\hat{C}} |s + \hat{H} \cdot \hat{C}|_\infty \tag{16}$$

여기서 $|s + c|_\infty$ 은 vector $s + c$ 의 ∞ -norm(그 구성 요소들의 절대치의 최대값)이다. 이것의 최적화는 변수 $\hat{C} = (C_{i_0}, C_{i_1}, \dots, C_{i_{L-1}})^T$ 을 선형 처리함으로써 구할 수 있다.

$$\min_c t \tag{17}$$

Subject to:

$$|s_k + \hat{H}_k \cdot \hat{C}| \leq t \quad k = 0, 1, \dots, N-1 \tag{18}$$

이러한 constraint들은 vector 형태로 쓸 수 있다.

$$\min_c t \tag{19}$$

$$\text{Subject to: } \begin{aligned} s + \hat{H} \cdot \hat{C} &\leq t \cdot \mathbf{1}_N \\ s + \hat{H} \cdot \hat{C} &\geq -t \cdot \mathbf{1}_N \end{aligned} \tag{20}$$

여기서 $\mathbf{1}_L$ 은 N 단위행렬에 속해 있는 벡터이다. 아직 값을 모르는 t 와 C 를 왼쪽으로 움직이고, constraint들을 묶으면, 최적화 문제는 다음과 같다.

$$\min_c t \quad (21)$$

$$\text{Subject to: } \begin{pmatrix} \hat{H} & -\mathbf{1}_N \\ -\hat{H} & -\mathbf{1}_N \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \hat{C} \\ t \end{pmatrix} \leq \begin{pmatrix} -s \\ s \end{pmatrix} \quad (22)$$

이 선형 동작에서 $2L+1$ 개의 알려지지 않은 $\{\hat{C}, t\}$ 과 $2N$ 개의 부등식은 다음과 같다.

$$\min c^T y$$

$$\text{Subject to: } Ay \leq b$$

여기서 y 는 최적화된 변수이다. 행렬 A 에서 벡터 b 와 c 는 잘 알려진 매개 변수들이다.

IV. 결과 및 분석

WHT의 크기가 $N=64$ 인 MC-CDMA system을 고려하였고, BPSK data format을 사용하였다. MC-CDMA 신호는 HPA와 AWGN 채널을 통과하여 전송하였다.

Constraint code에서 원소들의 위치는 부분집합 $I=(i_0, i_1, \dots, i_{L-1})$ 으로부터 선택된다. 우리는 두 가지 경우를 고려했다. 첫 번째 경우는 $\{i_k\}$ 가 서로 인접할 경우이고 두 번째 경우는 $\{i_k\}$ 이 random하게 선택될 때이다. 위의 최적화 문제는 random하게 발생하는 부분집합 I 에 의해 좋은 결과만 나오는 특별한 index만 고려하지 않고, 모든 가능한 이산적인 집합 I 에 대해 문제를 해결하여야만 한다.

그림 4에서, $N=64$ 이고, 길이가 $L=8$ 이고 constraint code는 인접하게 선택했을 때, PAPR은 13.7 dB에서 10.4 dB로 감소하여 기존의 방법과 비교하여 10^{-4} 에서 3.4 dB의 이득을 얻을 수 있다. 그러나, PAPR은 만일 random한 방법을 사용한다면 첫 번째 방법보다 더 떨어진다. 그리고 constraint code의 길이가 증가할수록, MC-CDMA의 PAPR은 비례하여 떨어진다. 그림 5에서 $L=24$ 이면, PAPR은 13.7 dB에서 4.5 dB로 떨어져 10^{-4} 에서 9.2 dB의 PAPR 저감 효과를 나타내고, PAPR은 L 에 비례적으로 감소함을 알 수 있다. 즉, PAPR과 constraint code의 길이 사이에는 trade-off가 있기 때문에 가장 좋은 경우를 찾아야 한다.

만일 HPA가 없다면 bit error rate는 AWGN 채널을 거친 BPSK와 같을 것이다.

$$P_e = Q(\sqrt{2E_b/N_0}) \quad (23)$$

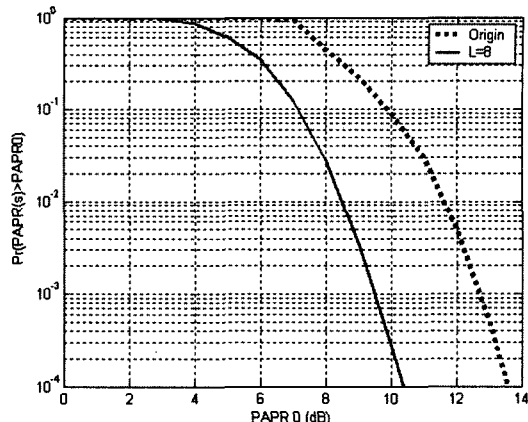


그림 4. $N=64, L=8$ 일 때 CCDF
Fig. 4. CCDF with $N=64$ and $L=8$.

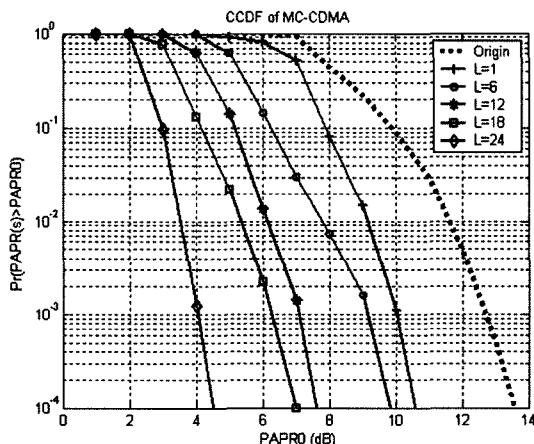


그림 5. $N=64$ 이고 L 에서 CCDF
Fig. 5. CCDF with $N=64$ and different value of L .

여기서 $Q(x) = 1/\sqrt{2\pi} \int_x^{+\infty} e^{-\frac{t^2}{2}} dt$ 이다.

그림 6을 볼 때, BER 결과는 이론치와 같다. 그래서 HPA가 없을 때의 PAPR 저감 기법은 BER 수행에서 어떤 손실도 가져오지 않고, 어떤 부가 정보도 필요하지 않다. 그림 7은 비선형 SSPA를 거친 신호의 BER을 보여준다. 선형 증폭기에서의 BER과 같게 나타나려면 9 dB 이상의 IBO(Input Back-Off)가 필요하다. 그림 8은 길이 $L=18$ 인 constraint code와 인접한 인덱스를 사용한 기법인 PAPR 저감 기법을 사용하기 전과 후의 MC-CDMA의 BER 성능을 보여준다. 그림으로부터 제안된 기법이 갖는 BER 성능 개선 효과는 매우 크게 나타남을 알 수 있다. IBO=0일

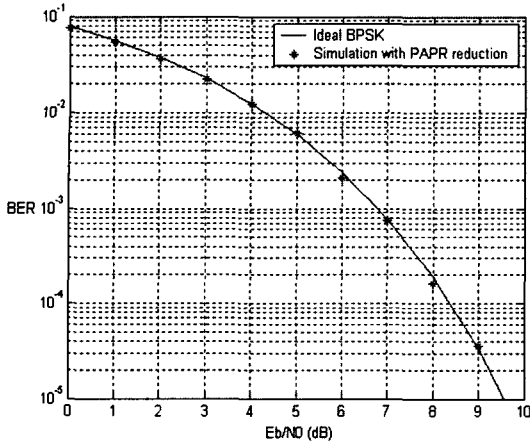


그림 6. HPA 없이 PAPR 저감 방법을 사용할 때의 BER
 Fig. 6. BER performance by PAPR reduction without HPA.

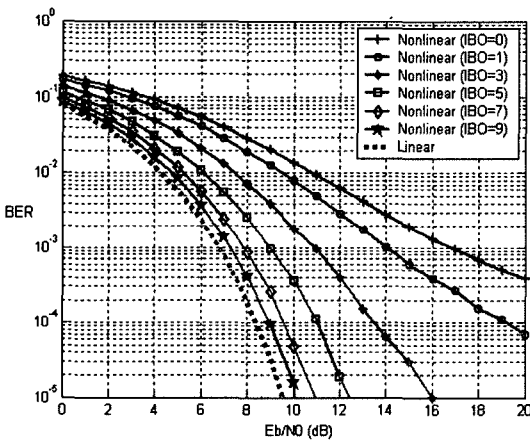


그림 7. SSPA를 사용한 MC-CDMA의 BER 평가
 Fig. 7. BER performance using SSPA.

때, PAPR 저감 기법을 사용하면, $BER=10^{-3}$ 에서, 약 5 dB 정도 향상된 SNR을 얻을 수 있다(17 dB에서 12 dB로 떨어진다.). BER 성능 분석에서 만약 random index를 사용하면 이 방법은 더욱 좋아진다. 그림 9에서 index가 random하게 선택될 때, BER 성능을 나타내었으며, $L=24$ 일 때 input back-off 없이도 이상적인 BER 곡선에 가깝게 된다.

V. 결 론

MC-CDMA system에서 PAPR을 저감하기 위해

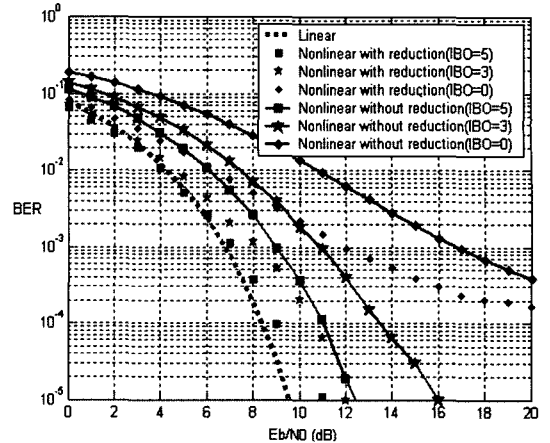


그림 8. PAPR 저감 전후의 SSPA를 지난 BER 평가
 Fig. 8. BER performance before and after PAPR reduction with SSPA.

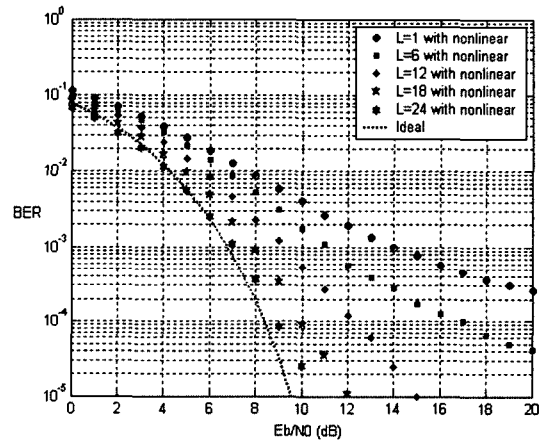


그림 9. PAPR 저감 기법을 사용한 SSPA를 거친 BER 평가
 Fig. 9. BER performance using PAPR reduction with SSPA.

constraint code를 이용하는 방법을 제안하였으며, 비선형 HPA를 고려하여 제안된 PAPR 저감 기법을 사용했을 때와 사용하지 않았을 때의 BER 성능을 분석하였다. 이 방법은 MC-CDMA에서 constraint code에 의해 출력 신호의 peak 값을 최소화 함으로써 PAPR을 낮출 수 있다. 이 방법은 MC-CDMA에서 효과적으로 PAPR을 낮출 수 있지만, PAPR 감소와 constraint code의 길이 사이에는 trade-off가 존재한다. 즉, constraint code의 길이가 길어지면 PAPR 저감 효과는 크게 나타나지만, 전송율에서 큰 손실을

가져오게 된다. 시뮬레이션 결과 N 이 64에서 constraint code의 길이 L 은 18이고 인접한 index가 사용될 때, PAPR은 10^{-5} 에서 6.7 dB 감소할 수 있다. 제안된 방법은 부가 정보가 필요하지 않기 때문에, side information의 채널에 대한 영향을 걱정할 필요가 없다. 결과적으로 BER 성능 분석으로부터 제안된 방법은 비선형 HPA를 고려하였을 때 큰 성능이득을 나타냄을 알 수 있다.

참 고 문 헌

- [1] T. F. Wong, T. M. Lok, "Transmitter adaptation in multicode DS-CDMA systems", *IEEE J. Select. Areas. Commun.*, vol. 19, no. 1, pp. 69-82, Jan. 2001.
- [2] I. Chih-Lin, R. D. Gitlin, "Multi-code CDMA wireless personal communication networks", *IEEE ICC*, pp. 1060-1064, 1995.
- [3] T. Ottoson, "Precoding for minimization of envelope variations in multicode DS-CDMA systems", *Wireless Personal Communications*, vol. 13, pp. 57-78, May 2000.
- [4] T. Ottoson, "Precoding in multicode DS-CDMA systems", *Int. Symp. Info. Thy.*(Ulm, Germany), *IEEE*, pp. 351, Jun. 1997.
- [5] T. Ottoson, T. Palenius, "The impact of using multicode transmission in the WCDMA system", *IEEE Vehicular Technology Conference, IEEE*, pp. 1550-1554, 1999.
- [6] K. G. Paterson, "On codes with low peak-to-average power ratio for multicode CDMA", *IEEE Trans. on Information Theory*, vol. 50, no. 3, pp. 550-559, Mar. 2004.
- [7] K. G. Paterson, "On codes with low peak-to-average power ratio for Multi-Code CDMA", *Tech. Rep. HPL-2001-115*, HP Laboratories, Bristol, UK, 2001.
- [8] K. Paterson, "Sequences for OFDM and multi-code CDMA: Two problems in algebraic coding theory", *Tech. Rep. HPL-2001-146*, HP Laboratories, Bristol, UK, 2001.
- [9] K. Sathanathan, C. Tellambura, "Peak-to-average power ratio analysis in multicode CDMA", *IEEE Vehicular Technology Conference, IEEE*, vol. 1, pp. 500-504, Sep. 2002.
- [10] N. Guo, L. B. Milstein, "Uplink performance evaluation of multicode DS-CDMA systems in the presence of nonlinear distortions", *IEEE J. Select. Areas. Commun.*, vol. 18, pp. 1418-1428, Aug. 2000.
- [11] N. Guo, L. B. Milstein, "The impact of nonlinear amplification on multi-code CDMA systems", *IEEE ICC*, pp. 1034-1038, 2000.
- [12] J. Tellado, J. M. Cioffi, "Efficient algorithms for reducing PAR in multicarrier systems", *IEEE International Symposium on Information Theory*, pp. 191, Aug. 1998.
- [13] I. Chih-Lin, G. P. Pollini, L. Ozarow, and R. D. Gitlin, "Performance of multi-code CDMA wireless personal communications networks", *IEEE Vehicular Technology Conference*, vol. 2, pp. 907-911, Jul. 1995.
- [14] F. Adachi, M. Sawahashi, and H. Suda, "Wideband DS-CDMA for next-generation mobile communications systems", *IEEE Commun. Mag.*, vol. 36, pp. 56-69, Sep. 1998.

김 상 우



2003년 2월: 한밭대학교 전자공학과 (공학사)
2003년 3월~2005년 2월: 충북대학교 전자공학과 (공학석사)
2005년 3월~현재: 충북대학교 전자공학과 박사과정
[주 관심분야] OFDM 통신시스템, UWB 통신 및 무선 LAN 등

서 재 원



1995년 2월: 충북대학교 전자공학과 (공학사)
1997년 2월: 광주과학기술원 정보통신공학과 (공학석사)
2003년 2월: 광주과학기술원 정보통신공학과 (공학박사)
2003년 4월~2004년 8월: LG전자기술원 MM연 선임연구원
2004년 9월~현재: 충북대학교 전기전자컴퓨터공학부 전임강사
[주 관심분야] 디지털 영상처리, 동영상 표준화, 신호처리

김 남 일



1996년 2월: 충북대학교 전자공학과 (공학사)
1998년 2월: 충북대학교 전자공학과 (공학석사)
2002년 3월~현재: 충북대학교 전자공학과 박사과정
1999년~현재: 한국전자통신연구원 이동통신연구단 이동패킷전송연구팀 선임연구원
[주 관심분야] 3GPP Long Term Evolution 시스템, OFDM 통신시스템, 이동 통신 및 통신신호처리기술 등

유 흥 균



1988년~현재: 충북대학교 전자공학과 정교수
1999년~현재: IEEE 논문 심사위원
2002년: 한국전자파학회 학술상 수상
2002년 3월~2004년 2월: 충북대학교 컴퓨터정보통신연구소 소장
[주 관심분야] 디지털 통신 공학, 이동/위성 통신 시스템, 통신 회로 설계

김 선 애



2005년 8월: 충북대학교 전기전자 컴퓨터공학부 (공학사)
2005년 9월~현재: 충북대학교 전자공학과 석사과정
[주 관심분야] 디지털 통신, OFDM 통신시스템, 전력선통신 등